

유한요소법을 이용한 네오디움 영구자석의 코어 설계

허관도^{*,#}, 예상돈^{**}

(#,*,** 동의대학교 기계공학과)

Design of Neodymium Permanent Magnetic Core using FEM

Kwan-Do Hur^{*,#}, Sang-Don Ye^{**}

(Received 24 July 2014; received in revised form 19 August 2014; accepted 16 October 2014)

ABSTRACT

Permanent magnets have recently been considered as device that can be used to control the behavior of mechanical systems. Neodymium magnets, a type of permanent magnet, have been used in numerous mechanical devices. These are permanent magnets made from an alloy of neodymium, iron, and boron to form the Nd₂Fe₁₄B tetragonal crystalline structure. The magnetic selection, magnet core design and mechanical errors of the magnetic component can affect the performance of the magnetic force.

In this study, the coercive force, residual induction, and the dimensions of the design parameters of the magnet core are optimized. The design parameters of magnet core are defined as the gap between the magnet and the core, the upper contact radius, and the lower thickness of the core. The force exercised on a permanent magnet in a non-uniform field is dependent on the magnetization orientation of the magnet. Non-uniformity of the polarization direction of the magnetic has been assumed to be caused by the angular error in the polarization direction. The variation in the magnetic performance is considered according to the center distance, the tilt of the magnetic components, and the polarization direction. The finite element method is used to analyze the magnetic force of an optimized cylindrical magnet.

Key Words : Neodymium(네오디움), Permanent Magnet(영구자석), FEM(유한요소법), Magnet Core(자심)

1. 서 론

최근 다양한 기계산업 부분에서 에너지의 최소화
화에 대한 요구에 따라 자석이 많은 기계적 장치
의 주 동력원 또는 보조 동력으로 사용되고 있다.

이러한 자석은 크게 전자석과 영구자석으로 구분
할 수 있고, 영구자석은 전자석에 비해 힘의 제어
가 제조 과정에 많이 의존하고 있으며, 정밀 장치
및 제어에 많은 문제점으로 여겨진다.^[1-6]

영구자석의 하나인 네오디움 자석은 가장 널리
사용되는 영구자석의 하나이며, 네오디움을 철, 붕
소와 합금시켜 만들며, 화학적 조성은 Nd₂Fe₁₄B이
고, 아주 강력한 영구자석이다.

일반적인 영구자석의 사용상 물성은 대부분 전
자적인 물성이나 아주 대략적인 힘에 대해서만 기

* Department of Mechanical Engineering, Dong-eui Univ.

Corresponding Author :

Department of Mechanical Engineering, Dong-eui Univ.

E-mail : kdhur@deu.ac.kr

** Department of Mechanical Engineering, Dong-eui Univ.

술하고 있다. 영구자석의 사용에 있어서 나타나는 물리적 현상은 상대 물체가 자화의 정도에 따라 변하여 이론적인 계산이 어려워 정밀한 제어가 힘들고 기계적인 힘에 대한 정의가 매우 어렵다.

영구자석을 기계 장치 및 부품으로 사용할 때, 여러 가지 오차 요인들이 기계의 정밀도 또는 정밀제어에 많은 문제를 일으키고 있다. 먼저, 기계 제조상에 있어서 부품들의 조립 및 정렬에 있어서 발생하는 기계제작상의 공차내의 오차로 인해 사용된 영구자석과의 물리적 힘의 변화로 나타나, 계획된 힘을 충분히 얻지 못하는 경우가 있다. 또 영구자석이 제조시에 이상적인 분극 방향을 벗어난 오차나 혹은 결정학적인 이유에 의한 분극 방향의 오차들이 자석의 외부 형상이 가지는 기준 축과의 오차들로 인해 영구자석을 활용한 설계시에 있어서 이상과 같은 오차들을 충분히 고려하고 설계해야 한다.^{17,8)}

현재 이러한 영구자석의 기계장치 및 부품설계에 대한 오차요인에 대한 문제의 인식 및 해결방안이 연구되지 않아 정밀 기계장치 및 부품설계에 있어 영구자석의 사용을 저해하고 있다. 본 연구에서는 영구자석의 활용에 있어서 기계 및 부품 제조에서 발생하는 정렬오차, 서로간의 간섭 등에 의한 힘의 변화 그리고 분극 방향의 불균형에 의한 기계적 힘의 변화에 대해 유한요소법을 이용하여 힘의 변화를 예측하고자 했다. 이러한 영구자석의 제조상에서 발생할 수 있는 정렬상의 오차 또는 내부 결정 구조에 의한 분극 방향의 오차와 영구자석을 기계부품으로 적용함에 있어서 발생할 수 있는 조립오차, 위치정렬 오차등에 의해 영구자석의 힘을 정밀하게 부품에 적용하기가 매우 어렵다.

유한요소법을 이용하여 영구자석과 기계부품 사이의 가공오차 및 조립오차를 정의하기 위하여, 제품 모델링시에 가공오차 및 조립오차를 임의의 각도 및 거리로 모델링되어 사용되었으며, 영구자석의 분극 방향과 영구자석 외부 형상에 대한 축과의 각도 또한 설계변수로 적용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 연구에 적용된 네오디움 자석은 원통형이며, 자석의 형상 및 물성은 최적화 되었으며, 조립오차, 자석간의 거리 및 분극 방향에 따

른 힘을 분석하였다.

2. 네오디움 자석의 물성치

네오디움 자석의 자기포화 상태에서 자장을 0으로 했을 때 잔류자기가 남는데, 다시 반대 방향으로 자장을 증가 시켰을 때 자화가 감소하고, 어느 세기의 자장에서 자화는 0이 된다. 이때의 자장의 세기는 보자력(Coercive force)이고, 자기 포화상태에서 자장을 0으로 되돌렸을 때 강자성체가 가지는 자기인 잔류 자속밀도(Residual induction)는 자석의 물성을 결정하는 주요한 설계 인자들이다.

네오디움의 자력을 일정 형상 내에서 최대값을 갖도록 하기 위해 원형 형태의 영구자석을 모델링하고 Fig. 1과 같이 1/4의 형상으로 모델링하였으며, 물성들은 현재 주로 사용되고 있는 네오디움 자석의 물성을 Table 1과 같이 적용하여 유한요소 해석 하였으며, 각 물성별 발생하는 총 자속 밀도(TFD)와 힘(F)을 계산하여 Table 1에 나타내었다. 유한요소 해석 결과 Table 1에서 5번째인 보자력 1,592,000 A/m와 잔류자속밀도 1.33 T 일 때 최대 힘(F)가 발생함을 알 수 있다.

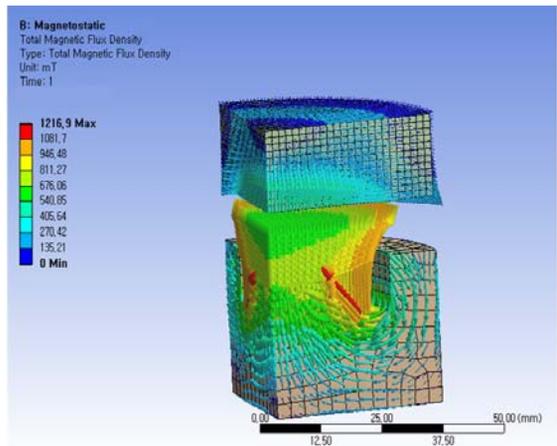


Fig. 1 The total magnetic flux density distributions on neodymium magnet

Table 1 Properties of neodymium magnet and FEM results

N	C _f [A /m]	R [T]	Force [N]	TFD [mT]
1	1114000	1.33	838.383719	1359.628969
2	1353000	1.08	611.653620	1223.900209
3	1353000	1.33	883.229111	1400.916521
4	1592000	1.08	632.017903	1233.041384
5	1592000	1.33	917.708078	1418.304141
6	1989000	1.08	657.065486	1243.986029
7	1989000	1.22	821.438842	1396.255391
8	2387000	1.08	675.270944	1251.655716
9	2387000	1.014	603.760023	1289.485668

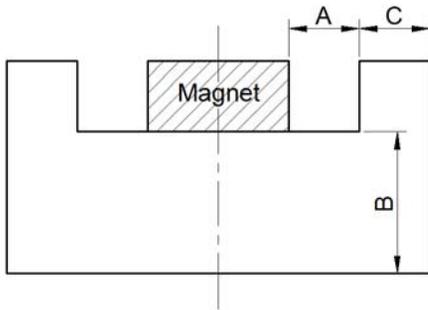


Fig. 2 Design parameters for magnetic core

3. 네오디움 자석의 코어설계

네오디움 자석 부품을 만들기 위해 네오디움 자석의 물성과 함께 자석의 능력을 최대한 이용하기 위해 자석에 부착될 코어의 설계 또한 아주 중요하다. 코어의 설계에 있어서 중요한 설계 인자들은 Fig. 2 와 같이 자석과 코어의 틈새(A), 자석 하부의 재료 두께(B) 그리고 코어 상부에 대상물과 작용을 일으키는 접촉 반경(C) 이다.

본 연구에서는 네오디움 자석의 크기는 고정하고 네오디움 자석 부품의 크기를 고려하여 부품의 크기를 $\phi 90$ mm 그리고 높이 33 mm 로 제한하였다. 코어에 사용될 3개의 설계인자를 최적화하기 위해 다구찌기법을 사용하였으며, Table 2와

같이 각각의 인자당 3개의 수준으로 실험계획을 하여 Table 3과 같은 직교배열표를 작성하고, 시뮬레이션 결과 대상에 미치는 총 힘의 합(F)를 반응값으로 사용하였다. 코어의 설계 목적을 대상에 미치는 총 힘(F)이 큰 것으로 하기 위해 신호 대 잡음비(S/N ratio)는 망대특성식을 사용하였다.

다구찌 분석 결과 인자별 S/N 비 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. 틈새(A)와 코어 상부(C)의 인자 영역이 코어 하부(B)의 인자 영역에 비해 힘에 많은 영향력이 미치고 있다. 따라서 최적 변수는 틈새(A)는 10mm, 코어 상부(C)는 15mm 인 A_3C_3 인자에서 힘이 상대적으로 큰 값을 나타내고 있고, 코어 하부(B)인자의 경우 18mm 와 23 mm에서 S/N 비 값이 유사하게 나타나고 있다. 인자 $A_3B_2C_3$ 와 $A_3B_3C_3$ 를 시뮬레이션 한 결과, 예측과 같이 각각 394.868 N 과 394.984 N 으로 나타났으며, 직교배열표에 제시된 인자들의 조합보다 양호한 결과를 나타내고 있다. 이 두 결과들은 힘의 차이가 아주 작아 제작상의 오차 이내에 있어 무

Table 2 Design factors and their levels for magnetic core

Design factors	Levels [mm]		
	1	2	3
Gap [A]	5	7.5	10
Lower thickness of the core [B]	13	18	23
Upper thickness of the core [C]	5	10	15

Table 3 Orthogonal array and results for magnetic core

NUM	A	B	C	F [N]	S/N Ratio
1	5	13	5	341.5896	50.6701
2	7.5	18	5	362.7839	51.193
3	10	23	5	374.2614	51.4635
4	7.5	13	10	381.6623	51.6336
5	10	18	10	390.2406	51.8266
6	5	23	10	366.8355	51.2894
7	10	13	15	393.7072	51.9035
8	5	18	15	374.8872	51.478
9	7.5	23	15	388.6018	51.7901

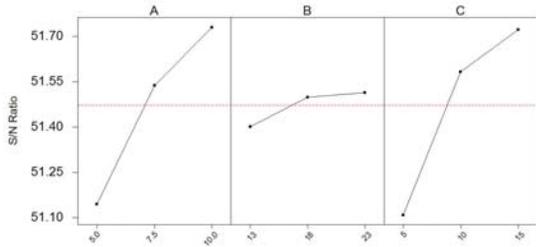


Fig. 3 Main effects for S/N ratios

시할 만하다고 판단된다. 따라서 재료 및 크기에 대해 이점이 있는 코어 하부(B)의 길이가 18 mm 인 A₃B₂C₃ 가 가장 알맞은 설계 인자들이다.

4. 네오디움 자석의 위치결정

기계장치 및 부품에 자석이 조립될 때 영구자석의 위치는 기계 작동력에 영향을 주는 주요한 설계 인자이다. 부품과 영구자석과의 경사각(α)와 영구자석의 중심거리에 따른 발생 힘을 분석하기 위해 Fig. 4와 같이 최적 물성 값으로 설계된 네오디움 자석 요소 3개와 상대적인 힘을 발생하는 평판 1개 그리고 자기장이 형성될 수 있는 공기에 대해 모델링하고, Fig. 4와 같이 경사각을 정의하였다.

네오디움 자석요소 서로 간의 중심거리가 80 mm ~ 200 mm 의 변화에 대해 시스템에 발생할 수 있는 힘(F_f)을 분석한 결과를 Fig. 5에 나타내었고 네오디움 요소 3개를 가지고 있는 시스템 전

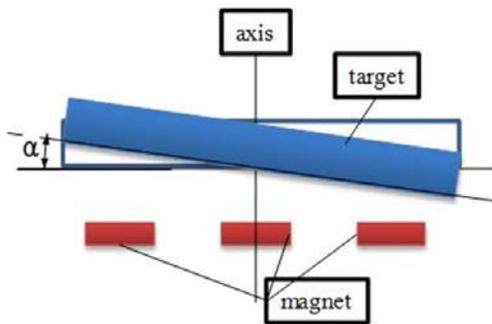


Fig. 4 The angle between magnet components and target

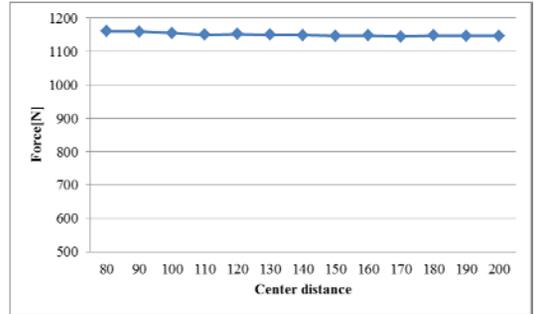


Fig. 5 The generated force according to the center distance of magnets

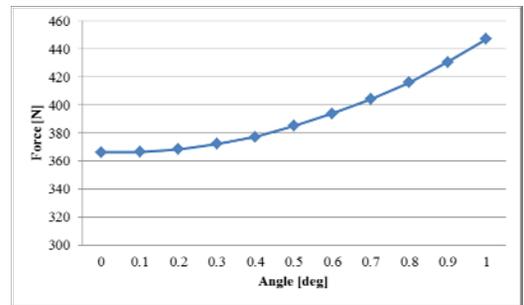


Fig. 6 The generated force according to angle between magnets and target

체에서 발생하는 힘들의 최대값과 최소값의 차이는 15.4 N로 나타났으나, Fig. 5에서 보듯이 이 차이 값은 전체 힘의 변화에는 아주 작은 변화를 보이고 있다.

각도의 대칭성을 위해 부품 중심과 중간 네오디움 자석간의 교차점 기준의 경사각에 대해 0° ~ 1°까지의 변화에 대해 발생한 힘을 Fig. 6에 나타내고 있다. 이러한 경사각은 음의 경사각에 대해서도 같은 결과를 나타낼 것이다. Fig. 7과 Fig. 8은 경사각 1°에 대한 총 자속밀도분포와 대상에 미치는 힘의 분포를 나타내고 있다. 경사각에 대해 발생한 힘들을 2차식으로 근사시킨 결과 식(1)과 같은 근사식을 만들 수 있었다. 여기서 마지막 항인 368.01 항은 각도가 0°일 때의 힘을 나타내며, 평형상태에서의 값을 표현하고 있다. 따라서 조립오차에서 오는 경사 오차에 의한 힘은 경사각도의 2차식으로 나타낼 수 있다.

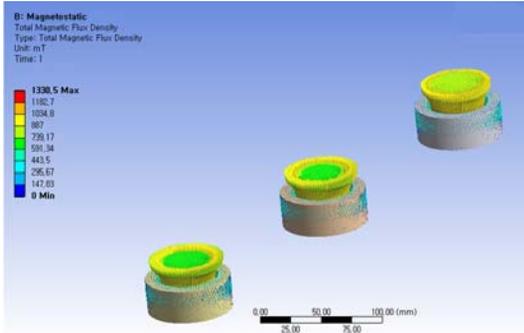


Fig. 7 The total magnetic flux density distribution in angle 1°

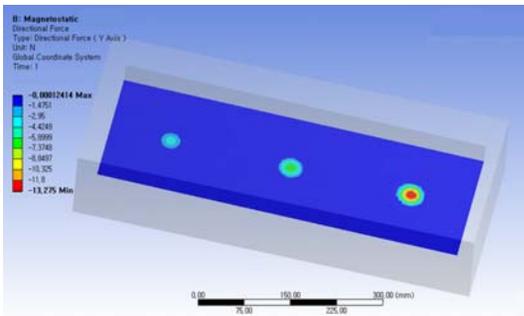


Fig. 8 The force distribution on target surface in angle 1°

$$F_t = 0.877\alpha^2 - 2.4747\alpha + 368.01 [N] \quad (1)$$

경사 각도에 따른 힘의 변화를 살펴보면 자석의 중심을 기준으로 각도가 기울수록 힘은 2차식의 형태로 증가함을 알 수 있다. 이것은 자기력이 일반적으로 거리의 제곱에 반비례하는 것과 관계가 있다고 생각된다.

4. 분극방향에 따른 네오디움 자석의 힘

분극 방향을 일반적으로 자석의 제조시에 강력한 자기장에 의해 형성이 되며, 분극 대상 재료의 결정의 분포와 결정의 방향에 영향을 받는다. 실제 다결정 재료의 분극에 있어서 분극방향을 정확

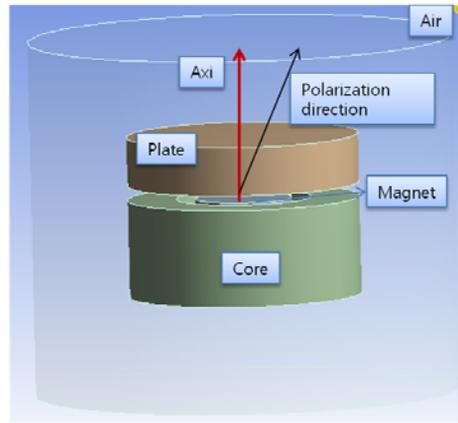


Fig. 9 Polarization direction of neodymium magnet

하게 정의하기는 어려우나, 설계나 일반적인 해석상에서는 평균적인 분극방향을 영구자석의 분극방향으로 정의해서 사용하고 있다.

모델링된 부품 중에서 영구자석의 물성치는 Table 1과 같이 보자력(coercive force)은 1,592,000 A/m, 잔류자속밀도(residual induction)는 1.33 T를 입력하였다. 그리고 코어 및 평판은 회주철과 SS416을 사용하고 B-H선도를 입력하였다.

영구자석의 외부 형상 축에 일치하는 분극 방향이 이상적일 경우 분극 방향이 0°라고 정의했다. 분극 방향에 대한 모델링과 정의는 Fig. 9에 나타내었다.

정의된 분극 방향을 0°~10°까지 변한다고 가정하고 분석한 결과를 Fig. 10과 같이 나타내었다. 상부 평판에 미치는 힘을 알기 위해 상부에 작용하는 요소별 힘을 모두 합하여 평판에 미치는 총 힘을 계산하였다.

분극 방향 0°~10°에 따른 힘을 2차 다항식으로 근사하면 식 (2)와 같이 표현될 수 있다. 여기서, α_p 는 분극방향의 각도, 각 계수는 모델의 형상 및 조립 등에 의해 결정될 수 있는 계수이며 마지막 항 79.774는 분극방향이 축방향과 동일한 0°일 때 생성되는 힘을 나타내고 있다. 식 (2)는 본 연구에서 정의된 네오디움 자석에 대한 분극방향에 따른 결과이다.

$$F_p = 0.0216\alpha_p^2 + 0.0349\alpha_p + 79.774 [N] \quad (2)$$

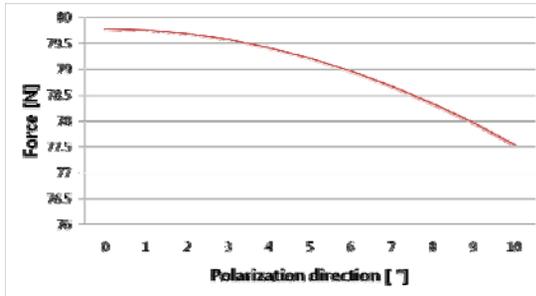


Fig. 10 Mechanical force change of neodymium magnet according to polarization direction

4. 결론

네오디움 자석의 기계부품 사용에 있어서 네오디움 자석의 적절한 사용을 위해 자석의 선택, 자석의 코어 설계 그리고 기계적 오차에 대한 분석을 하였다.

1) 코어의 설계를 최적화하기 위해 자석과 코어와의 간격(A) 5 mm ~ 10 mm, 코어 하부 두께(B) 13 mm ~ 20 mm 그리고 코어 상부의 접촉 반경(C) 5 mm ~ 15 mm를 설계변수로 하고 유한요소법에 의해 계산된 힘을 반응 값으로 한 결과, 자석과 코어 간격(A)와 코어 상부의 접촉 반경(C)가 변수 영역 내에서 상대적으로 평판에 작용하는 힘에 영향력이 크게 나타났다. 그리고 각 변수의 최적 수준은 자석과 코어(A)는 10 mm, 코어 상부의 접촉 반경(C)는 15 mm 그리고 코어 하부 두께(B)는 재료 감소와 부피를 고려하여 18 mm 로 결정되었다.

2) 기계적 오차 중의 하나인 자석 부품의 중심거리 차이에 의해 발생하는 힘을 분석한 결과 자석의 중심거리에 따른 힘의 차이는 미소하게 나타났다. 조립시에 나타날 수 있는 평판과 자석간의 경사오차의 경우 경사도의 증가에 따라 힘이 2차 다항식의 형태로 증가함을 알 수 있었다.

3) 자석의 제작 과정에 발생하는 분극 방향 오차에 따른 기계적인 힘의 변화에 대해 유한요소해석을 사용하여 분석한 결과 분극 방향 오차가 증가함에 따라 2차식의 형태로 힘이 감소함을 알 수 있었다.

후 기

“이 논문은 2013학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음. (과제번호 2013AA126)”

참고문헌

- (1) R. J. Parker, “Advances in Permanent Magnetism,” Wiley, New York, 1990.
- (2) Arvi Kruusing, "Actuators with permanents having variable in space orientation of magnetization," Sensors and Actuators, A 101, pp. 168-174, 2002
- (3) T. Nakata, N. Takahashi, K. Yoneda, “Numerical analysis of flux distribution in permanent-magnet stepping motors,” IEEE Trans. Magnet., vol. 14, No. 5, pp.548-550, 1978.
- (4) G. Tsekouras, S. Kiartzis, A. Kladas, J. Tegopoulos, “Neural network approach compared to sensitivity analysis based on finite element technique for optimization of permanent magnet generators,” IEEE Trans. Magnet., vol. 37, No. 5/1, pp.3618-3621, 2001.
- (5) D. DE Bhailis, C. Murray, M. Duffy, J. Alderman, G. Kelly, S.C.O. Mathuna, “Modeling and analysis of a magnetic microactuator,” Sensors and Actuators, A 81, pp.285-289, 2000.
- (6) Ock Hyun Kim, “Design of Magneto-Rheological Fluid Clutch for Machine Tool Application,” J. of KSMPE, Vol. 8, No. 1, pp. 57~63, 2009.
- (7) Ye, S. D., Hur, K. D., "Analysis of positioning of permanent magnets for large scale surge relief valve using the finite element method," International symposium on green manufacturing and applications, 2013.
- (8) Ock Hyun Kim, Min Ki Lee, “Development of a Magnetic Seal and the Leak Test,” J. of KSMPE, Vol. 10, No. 2, pp. 79~83, 2011.